

2. Infrastructures réseaux pour les systèmes urbains

- Les réseaux dans la ville
- L'accès au médium
- Le routage
- **Les réseaux cellulaires**
- Le déploiement des réseaux sans fil dans la ville

Hervé Rivano

VILLES INTELLIGENTES : DÉFIS TECHNOLOGIQUES ET SOCIÉTAUX

Un bref historique

1^{ère} étape : la voix

- Années 50 : balbutiement
- Années 80-90 : GSM « 2G »
 - ✓ Gestion de mobilité, authentification et sécurité, etc.



2^{ème} étape : la donnée

- SMS en 2G, puis GPRS/EDGE en « 2,5G » : on « triche »
- Années 2000 : émergence Internet mobile (3G)
- Fin 2000 : arrivée des smartphones, marché bouleversé
- Années 2010 : 4G et Internet mobile haut débit

2

Pour faire un bref historique, les premières étapes de réseaux cellulaires, c'était pour transmettre de la voix, pour se téléphoner les uns aux autres, avec des balbutiements technologiques dans les années 50 et l'arrivée sur le marché dans les années 90 du GSM qu'on appelle aussi la 2G. À ce moment-là, on était capables de gérer la mobilité des terminaux, d'authentifier les communications et d'avoir une certaine forme de sécurité, de tarification, tous les services qu'on a l'habitude d'avoir.

Dans un 2^{ème} temps, on a voulu transmettre de la donnée. Alors au départ, on a fait du SMS, puis du GPRS et Edge, ce qu'on appelle la 2,5 G en trichant. C'est-à-dire qu'on transmettait des données sur des canaux qui étaient faits soit pour la signalisation pour le SMS, soit pour la voie pour GPRS et Edge.

À partir des années 2000, il y a l'émergence de l'Internet mobile pour de vrai avec la 3 G, et à la fin des années 2000, l'arrivée des smartphones sur le marché, qui bouleverse complètement l'utilisation du réseau cellulaire. Où, finalement le produit principal n'est plus le transport de la voix, mais le transport de la donnée et l'Internet mobile.

Et aujourd'hui, nous sommes dans la fin du déploiement de la 4G et l'émergence de l'Internet mobile à haut débit.

Situation actuelle

Capacité actuelle ~ 1M x celle de 1957

Toutes les métropoles sont couvertes

- Cellule ~ 500m de diamètre
- 4G ~ 100Mbps/km²



Plus d'un terminal / personne (71M en France, mars 2015)

- Certains utilisateurs abandonnent l'ADSL
- Pays émergents : parfois seule infrastructure fiable
- Débuts de l'Internet des Objets

3

La capacité actuelle des réseaux cellulaires est peu ou prou 1 000 000 de fois celle des réseaux qui étaient présents à la fin des années 50.

Toutes les grandes métropoles sont couvertes et dans les villes, notamment européennes, une cellule fait de l'ordre de 500 mètres de diamètre.

La 4 G, actuellement déployée, propose des débits de l'ordre de 100 mégabits par kilomètre carré.

Aujourd'hui, dans les pays développés, chaque personne possède plus d'un terminal actif. Il y en a actuellement 71 millions en France. On voit certains utilisateurs qui abandonnent l'Internet fixe pour n'utiliser plus que l'Internet mobile.

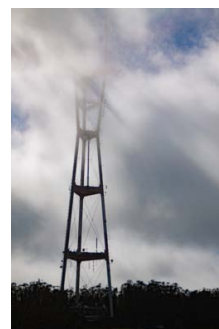
Et dans les pays émergents, parfois, c'est même la seule infrastructure qui soit réellement fiable pour communiquer.

Et maintenant, on va au-delà de la communication des citoyens. On fait communiquer des objets, et on voit l'émergence de l'Internet des objets.

Une infrastructure au bord de la saturation

Un scénario plausible

- Grandes métropoles européennes : 15-25 000 pers./km²
- Supposons 50% d'abonnés haut débit
- 10% actifs simultanément, demandant 5Mbps (flux télé quasi HD)
 - ✓ => débit nécessaire ~ 5Gps/km² vs 4G ~ 100Mbs/km²



Saturation des grands centres urbains en débit

- Aujourd'hui : situations exceptionnelles (événementiel, ...)
- Demain des besoins plus exigeants :
 - ✓ Flux vidéo HD/4K (résidentiel et mobile, up et downlink)
 - ✓ Applications smart-cities complexes

4

Alors, ça pose quelques difficultés. Notamment, l'infrastructure cellulaire est au bord de la saturation, y compris la 4G qu'on est en train de déployer.

Prenons un scénario plausible. Dans les grandes métropoles européennes, on voit une densité de population de l'ordre de 15 à 25 000 personnes par kilomètre carré. Donc dans les zones les plus denses des villes, ça va bien au-delà. Et certaines métropoles des pays en développement sont largement plus peuplées que ça. Supposons qu'on a une personne sur 2 qui est abonnée à l'Internet haut débit, et que sur ces personnes-là, 1/10ème utilise son abonnement au même moment pour regarder un flux de télévision, même pas un flux en haute définition, qui prend 5 mégabytes seconde. On se retrouve tout de suite avec un débit nécessaire qui est de l'ordre de 2 Gigabits seconde par kilomètre carré, c'est à dire 20 fois ce que la 4G qu'on est en train de déployer est capable d'offrir.

La saturation, on la voit déjà dans les grands centres urbains en terme de débit. Alors aujourd'hui, c'est dans des cas de situations exceptionnelles, notamment de l'événementiel, des grands matchs de foot ou des grands rassemblements. Demain, avec des besoins plus exigeants en termes de service, ça va arriver beaucoup plus quotidiennement. Ça sera notamment les flux de vidéo en très haute définition ou des applications beaucoup plus complexes pour la ville intelligente, notamment celles qui vont impliquer de la vidéo.

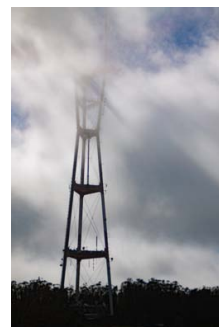
L'enjeu de la capacité

Capacité actuelle ~ 1M x celle de 1957

- Augmentation du spectre : 25x – « white space »
- Meilleure couche physique : 5x – gestion d'interférence
- Densification du réseau : 1600x

Densifier encore le réseau

- Possible grâce aux progrès de la couche physique
- Architectures hétérogènes : macro/micro/femto – cellules
- Problématique sociétale et énergétique
- Management complexe



5

Pour gagner encore plus en capacité, il faudrait continuer à densifier le réseau. Alors, c'est possible grâce au progrès de la couche physique, qui permet de mieux gérer les interférences. Et cela se fait actuellement avec des architectures hétérogènes qui combinent des macro-cellules, celle de 500 mètres de diamètre que je citais précédemment, avec des microcellules qui renforcent la capacité vers les zones de forte densité, voire même des femto-cellules à l'intérieur des bâtiments. Cependant, ça pose des problématiques à la fois sociétales et énergétiques.

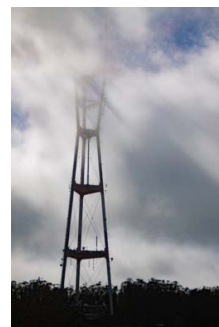
Compromis capacité - énergie

« Plus du même » impossible

- Energie actuelle ~ 1% conso globale pays développé
- Augmenter l'infrastructure => 1 réacteur nucléaire pour les télécom

« Peur des ondes » et surtout des antennes

- Invisibilité des ondes anxiogène – le seul élément visible est l'antenne
- Pourtant + antennes = - puissance transmission = - exposition



Adapter l'infrastructure à la dynamique d'usage

- Optimisation puissance de transmission
- Virtualisation et mutualisation des coûts fixes (clim.)
- Capillarité et sobriété d'usage

6

En particulier, il est impossible d'aller encore plus loin sans se poser des questions énergétiques. Aujourd'hui, tous les pays développés consomment peu ou prou 1 % de leur consommation globale d'énergie pour les infrastructures de télécom.

Si on augmentait l'infrastructure actuelle pour atteindre les objectifs cités précédemment, il faudrait à peu près un réacteur nucléaire par pays, uniquement pour l'infrastructure de télécom. Avec la crise énergétique et la prise de conscience écologique, c'est quelque chose qui semble impossible.

Par ailleurs, il y a une peur des ondes qui s'est développée dans les sociétés, et en particulier des antennes, du fait que les ondes étant invisibles, elles sont anxiogènes. Et l'élément visible du réseau, c'est l'antenne. Et donc, sur le déploiement des antennes s'est focalisée une certaine forme de résistance. Pourtant, si on y regarde bien, augmenter le nombre d'antennes, c'est réduire la distance entre les antennes et les terminaux, donc diminuer les puissances de transmission et in fine, diminuer même l'exposition aux ondes électromagnétiques des gens.

L'autre solution consiste à **adapter l'infrastructure à la dynamique d'usage**, pour essayer de gagner de l'énergie, quand c'est possible.

Infrastructure dynamique

Complicé

- Interdépendance des paramètres, impératif de couverture

Mais indispensable

- « Coller » à l'activité urbaine, éviter le surdimensionnement

Extinction : climatisation = majeure partie coût énergétique

Virtualisation : **gestion agile**

Capillarité : exploiter la diversité

- Sobriété d'usage
- Éviter les utilisateurs de bordure (« cell edge »)



7

Alors, avoir des infrastructures dynamiques, ça veut dire **coller à l'activité urbaine** et éviter le surdimensionnement, et faire par exemple qu'une gare puisse supporter le trafic lorsqu'il y a un pic de transport, mais ne consomme pas autant d'énergie, la nuit, quand il n'y a plus personne.

Alors, c'est complexe du fait de l'interdépendance des paramètres de configuration des antennes, à la fois au sein d'une même station de base, mais aussi avec les stations de base voisines.

Mais pour gagner de l'énergie, la seule solution in fine, c'est **d'éteindre des nœuds**, notamment parce que la majeure partie du coût énergétique d'un nœud, c'est la climatisation qui permet de refroidir le calculateur. Le problème, c'est qu'éteindre une antenne, ça pose des soucis sur un impératif de couverture, où chacun veut pouvoir émettre ou recevoir un appel à n'importe quel moment, sans avoir à se soucier est-ce que l'antenne au-dessus de moi est éteinte ou pas.

Pour aller dans cette direction malgré tout, des **solutions de virtualisation**, c'est-à-dire de décorrélation du logiciel et du matériel, permettent de mutualiser les coûts de climatisation en rapatriant tout le calcul qui lui, est coûteux énergétiquement, dans des data-centers, avec une seule climatisation pour plusieurs antennes. Ça permet par ailleurs d'avoir une gestion plus agile des ressources.

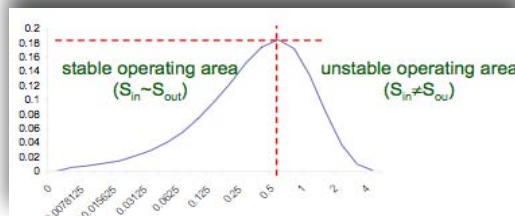
L'autre solution, enfin, est **d'exploiter la capillarité des réseaux** et les multiples interfaces qui sont sur nos terminaux, pour avoir une **sobriété d'usage** de l'infrastructure cellulaire et utiliser les alternatives quand c'est possible. Voire même avec des communications multi-saut

de rapatrier les données des utilisateurs qui sont en bordure de cellules et qui sont eux, les plus coûteux en énergie, vers un utilisateur qui servira de relais, qui sera plus proche du centre de la cellule, où il y aura une communication plus efficace.

Saturation de l'accès

Situation connue

- Sur-concentration d'utilisateurs – personne n'a d'accès
- Effet d'Aloha



Aloha toujours au cœur de la demande d'accès

- Peu performant mais incontournable
- Asymétrie : terminaux ne « s'entendent pas »
- Optimisation par préambules

8

Une autre situation de saturation, que tout le monde a rencontrée, notamment au Nouvel An, quand dans une grande concentration de personnes, on essaye d'envoyer un texto à tout le monde pour mettre une photo du feu d'artifice, on se rend compte que personne n'a d'accès au réseau.

C'est en effet de la méthode d'accès Aloha, dont on a parlé déjà dans la séquence sur les couches MAC, où voyez, sur la courbe que quand on augmente le nombre d'utilisateurs, au début, il y a aussi un plus grand nombre d'utilisateurs qui accède au réseau. Puis on arrive au pic d'utilisation du réseau et là ça s'effondre.

C'est-à-dire que quand on augmente le nombre d'utilisateurs qui essaient d'avoir accès aux réseaux, on se retrouve à avoir de moins en moins d'utilisateurs qui ont effectivement accès, jusqu'à n'avoir plus personne.

Ce problème de cette méthode d'accès est incontournable, et c'est l'un des défauts de performance, mais on ne peut pas s'en passer dans les réseaux cellulaires du fait de l'asymétrie du réseau. C'est-à-dire que quand un terminal essaie de communiquer, il n'entend pas les autres qui essaient aussi. Et donc in fine, il n'y a que Aloha pour demander l'accès aux réseaux.

Alors, on a optimisé ces méthodes d'accès en faisant des demandes sur des messages de plus en plus courts, pour éviter les périodes de collision, mais le problème fondamental demeure.

Ville connectée ... par le cellulaire ?

« Machine Type Communication » et « Machine to Machine »

- Grande densité et faible trafic, 4G prévue pour l'inverse

Optimisation des méthodes d'accès

- Procédures simplifiées pour collecte pour la 5G ?

Virtualisation

- Changement de paradigme : un « terminal » par application
- Mutualisation des accès – exploitation capillarité

Infrastructures dédiées

- SigFox, LoRA : efficaces pour certaines applications
- Réutilisation 2G : matériel peu cher, passage à l'échelle ?



9

Alors, comment faire quand on va voir arriver l'émergence des capteurs et de l'Internet des objets avec des grandes densités de nœuds? Et puis des communications de type « machine to machine » ou « machine type communication » selon le vocable. On va avoir donc une grande densité de nœuds qui vont chacun émettre un faible trafic.

La **4G est prévue pour exactement l'inverse**, c'est-à-dire une densité raisonnable d'utilisateurs qui chacun, demandent beaucoup de trafic.

Donc une des pistes de recherche intéressante est **d'optimiser les méthodes d'accès** et d'en dédier pour les communications machine to machines, avec des **procédures simplifiées** qui seront peut être intégrées dans la 5ème génération.

Ou bien on peut essayer, en exploitant la **capillarité des réseaux**, de mutualiser les accès en s'envoyant l'information de nœud en nœud pour qu'il y en ait plus qu'un qui envoie l'information vers le réseau, cellulaire.

Enfin, il y a des **infrastructures dédiées** qui sont déployées actuellement. SigFox et LoRA sont les plus connues actuellement, qui sont extrêmement efficaces en termes d'énergie pour certaines applications, mais restent limitées à ces cas particuliers. Et certains opérateurs voudraient pouvoir réutiliser l'infrastructure 2G, qui est déjà fortement rentabilisée, donc coûte très peu cher à utiliser, pour faire passer des informations machines à machines. Mais on peut supposer que ce sera une solution transitoire qui ne passera pas l'échelle, avec des déploiements très denses.

Les défis de la 5G

- Maîtriser la consommation énergétique
 - Y compris des terminaux
- Grandes densités de terminaux hétérogènes
 - Adaptation à l'activité urbaine
- Virtualisation des cellules et/ou des terminaux
 - Agilité et optimisation

Concentrer les ressources là où elles sont nécessaires
Capillarité pour ne gaspiller ni énergie ni accès

10

Donc pour conclure cette séquence, les défis de la **prochaine génération de réseaux cellulaires** dans le milieu urbain, ce sera nécessairement de **maîtriser la consommation énergétique de l'infrastructure**, mais aussi **des terminaux** qui sont très nombreux, dont la consommation n'est pas payée par les opérateurs. Et donc, elle a été peu regardée jusqu'à présent, mais a un impact environnemental très fort, d'autant plus si on considère les batteries.

Enfin, il faudra prendre en compte des **grandes densités de terminaux hétérogènes**, à la fois des smartphones, des utilisateurs humains qui vont avoir un certain type de trafic et des capteurs ou des objets connectés, qui vont avoir un trafic plus sporadique et assez différent. Et il faudra de toute façon adapter l'infrastructure à l'activité urbaine.

Et les techniques de **virtualisation des cellules, voire même des terminaux**, permettraient d'avoir une agilité de fonctionnement du réseau, une optimisation en temps réel pour être plus sobres en consommation énergétique.

Et donc, la phrase de fin, c'est qu'il faut **concentrer les ressources là où elles sont nécessaires** et **utiliser les réseaux capillaires** pour ne gaspiller ni l'énergie ni les accès disponibles dans le réseau.

Illustrations & photos : crédits

p. 4-5 : droits réservés

p. 6-8 : droits réservés

p. 9 : droits réservés

p. 11 : droits réservés